干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2019.04.22

基于改进型 *TVDI* 在干旱区旱情监测中的应用研究①

陈丙寅[1,2]， 杨 辽[1]， 陈 曦[1,3]， 王伟胜[1]

（1 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011； 2 中国科学院大学，北京 100049；
3 中国科学院中亚生态与环境研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要： 干旱是全球范围内影响最为广泛的自然灾害之一，其所导致的土壤沙漠化、荒漠化和盐碱化给生态环境造成不可逆的危害。通过对 MODIS 数据进行投影转换、去云等预处理的基础上，利用地形校正对 *TVDI* 模型进行改进，构建了改进型的温度植被干旱指数（*mTVDI*）用于新疆干旱区旱情监测。利用土壤实测数据对 *mTVDI* 及传统的 *TVDI* 模型进行对比验证。研究结果表明：（1）利用 *EVI* 与校正后的 *LST* 构建的 $mTVDI_E$ 对干旱区旱情的敏感度最高，与实测土壤水分数据的相关性 R^2 为 0.74。（2）从空间上看，新疆 2015 年旱情分布以塔里木盆地和准噶尔盆地为两个干旱中心，旱情状况由严重逐步向周围山区递减至湿润状态。从时间上看，新疆 6 月、7 月和 8 月旱情最为严重。（3）研究利用 TRMM 降水数据对基于 $mTVDI_E$ 反演的新疆旱情时空分布特征进行对比分析，结果表明二者所表现出的旱情时空分布较为一致，不同时间段内的降水量与 $mTVDI_E$ 之间具有一定的相关性，且均通过了 $P<0.01$ 显著性检验。综上，基于 *TVDI* 所提出的 $mTVDI_E$ 能够有效开展新疆干旱区旱情监测，且精度较高，从而为今后定量化开展大区域尺度旱情监测研究提供参考。

关 键 词： 干旱区；旱情监测；*TVDI*；TRMM
文章编号： 1000－6060(2019)04－0902－12(0902～0913)

干旱是全球范围内最常见、最复杂的自然灾害之一，具有影响范围大、持续时间长、破坏性大等特点，不仅造成巨大的经济社会损失，同时对生态环境产生重大威胁。近年来，受全球气候变化的影响，干旱区旱情状况更加复杂，因此定量化开展大区域尺度旱情监测研究对于把握全球干旱区气候变化规律、保障生态安全、预防旱灾的发生发展具有重要的现实意义[1－6]。传统旱情监测以现场监测方式为主，包括：探针测量、时域反射测量等诸多方法，但是这些方法消耗巨大的人力物力且效率低，尤其是山区和偏远地区采样困难，使得大范围监测难以实现。遥感技术因其具有监测范围广、光谱特征丰富等优势，有效弥补了地面站点监测的不足，已成为目前旱情监测的重要手段[7－10]。当前以 *TVDI*（Temperature Vegetation Dryness Index）为代表的植被指数遥感旱情监测方法，通过利用植被冠层温度和植被指数的变化特征，构造出地表温度—植被指数的特征空间，耦合温度植被干旱指数，能够对不同下垫面实现大范围长时序监测，已在旱情监测方面得到广泛应用[11－14]。SCHIRMBECK 等[15]比较了两种 *TVDI* 模型用于巴西大豆种植区的旱情监测，结果表明基于作物参数化构建的 *TVDI* 模型能够确定作物旱情发生的时间和频率。ZHU Wenbin 等[16]提出了一种改进型 *TVDI*，采用连续干旱监测的方法突破了传统依靠空间分辨率主导方法的限制。YANG Ruowen 等人对 *TVDI* 干边拟合方程进行改进，利用二次方程来表示干边拟合方程，对 2010—2012 年云南旱情状况进行监测[17]。国内众多学者利用 *TVDI* 模型对我国旱情状况也做了不少工作。刘艳伟等利用 Landsat 数据构建了由归一化植被指数和地表温度数据建立的二维特征空间，拟合了干、湿边方程，进而计算了 *TVDI*，对朝阳县旱情状况进行了分析和评价[18]。葛少青等利用三种干旱监测方法对干旱区沼泽湿地土壤水分进行监测，指出三种干旱指数与

① **收稿日期：** 2019－01－12； **修订日期：** 2019－03－15
基金项目： 国家重点研发计划项目（2017YFB0504204）；国家自然科学基金项目（41761144079）资助
作者简介： 陈丙寅（1994－），男，河南驻马店人，硕士，研究方向为干旱区旱情监测. E-mail：13276382776@163.com
通讯作者： 陈曦（1964－），男，浙江诸暨人，博士生导师，研究员，主要研究方向为资源环境遥感与地理信息系统
E-mail：chenxi@ms.xjb.ac.cn

土壤实测数据之间存在明显的负相关关系[19]。然而这些工作都侧重于小区域短时效的研究,针对干旱区大区域尺度植被生长季旱情状况的研究较为少见。

鉴于此,本文以 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)光谱数据为数据源,对传统的 *TVDI* 旱情监测模型进行改进,将改进过后的温度植被干旱指数(modified Temperature Vegetation Dryness Index,*mTVDI*)用于我国新疆干旱区植被生长季旱情监测研究,以期为今后进一步开展干旱区旱情监测提供新思路。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

新疆干旱区介于 73°20′~96°25°E,34°15′~49°10′N 之间,深居亚欧大陆中心,温带大陆性气候。由于特殊的地理位置,主要依靠大西洋湿润气团带来降水,南疆年降雨量 20~100 mm,北疆年降雨量 100~500 mm,气温年、日较差大,光照充足,蒸发强烈,是全球典型的干旱半干旱气候区。新疆地形轮廓为“三山夹两盆”,北部阿尔泰山脉,南部昆仑山脉,天山山脉横贯中部,塔里木盆地和准格尔盆地夹在其中。全国第一第二大沙漠塔克拉玛干沙漠和古尔班通古特沙漠分布于此,自然环境复杂多样。根据新疆植被物候时空变化特征[20]及新疆 2015 年植被生长实际情况,2015 新疆植被生长季为 4~10 月份即第 97 天~第 305 天。

1.2 数据源与预处理

1.2.1 遥感数据 遥感数据主要采用 MODIS 数据产品、SRTM 高程数据以及 TRMM 降水数据。MODIS 数据产品具有覆盖范围广、时间分辨率高等特点,能够满足时序研究的需要。本文选取的 MODIS 数据产品包括 16 d 合成植被指数(Vegetation Index,*VI*)产品 MODIS13A2 和 8 d 合成地表温度(Land Surface Temperature,*LST*)产品 MODIS11A2[21]。其中,MODIS13A2 包括 *NDVI*(Normalized Difference Vegetation Index)和 *EVI*(Enhanced Vegetation Index)两种数据产品。MODIS11A2 产品为 8 d 合成产品,需要对其进行进一步处理,合成为 16 d 产品,以确保与植被指数产品时序相一致。数字高程模型数据(Digital Elevation Model,DEM)选取 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)高程数据,具有覆盖范围广、精度高、应用广泛等特点,经重采样后分辨率为 1 km[22]。降水数据采用 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)卫星数据 TRMM3B43,是由 TRMM3B42 数据、NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)气候预测中心气候异常系统的全球格点雨量测量器资料和全球降水气候中心的全球降水资料合成的全球网格降水数据,单位为整月平均每小时降水量($mm\cdot h^{-1}$),空间分辨率为 0.25°×0.25°,经重采样后分辨率为 1 km[23]。所需遥感数据详细信息如表 1 所示。

1.2.2 实测数据 实测土壤含水量数据来源于 2015 年 6 月野外实测采样工作,共计 50 个样点,采样点位置是根据新疆不同类型植被分布情况统计抽样确定,具体位置如图 1。采样时间要求与卫星过境时间一致,天气要求晴朗且风力较小。采用土钻法采集 0~10 cm 土层样本并取三次重复,用铝盒封装。将土壤样本带回实验室用烘干法烘干称重得到土壤含水量数据。具体公式如下:

$$W=\frac{w_1-w_2}{w_2}\times 100 \tag{1}$$

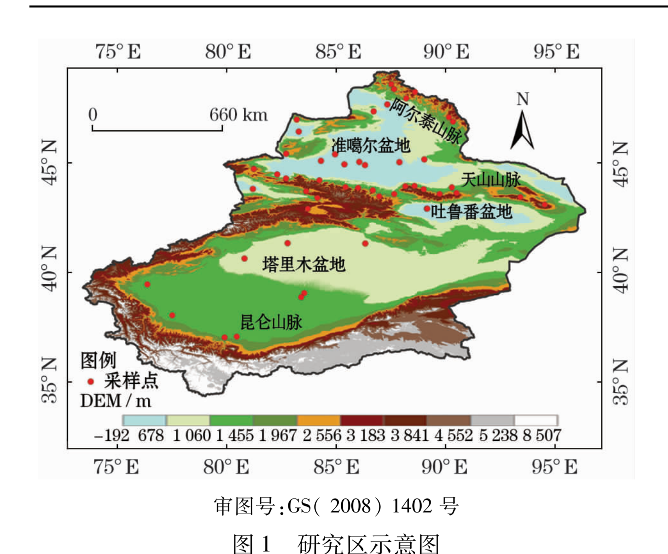
式中:w 为土壤含水量(%),w_1 为湿土质量(g),w_2 为烘干后土的质量(g)。

1.2.3 数据预处理 MODIS 数据产品需要利用 MRT(MODIS Reproject Tool)工具对其进行几何校正、投影转换、格式转换、数据抽取等前期处理,再利用 ArcGIS 对研究区进行裁剪、波段运算合成等工

表 1 遥感数据详细参数信息

Tab. 1 Detailed parameter information of remote sensing data

数据类型	数据名称	数据选取时间	时间分辨率	空间分辨率	数据来源
地表温度数据	MODIS11A2	2015 年第 97~305 d	8 d	1 km×1 km	美国国家航空航天局 https://modis.gsfc.nasa.gov
植被指数数据	MODIS13A2	2015 年第 97~305 d	16 d	1 km×1 km	美国国家航空航天局 https://modis.gsfc.nasa.gov
高程数据	SRTM			30 m×30 m	美国太空总署、美国国防部国家测绘局、德国与意大利航天机构 http://srtm.csi.cgiar.org
降水数据	TRMM3B43	2015 年第 97~305 d	1 h	0.25°×0.25°	美国气候预测中心 https://mirador.gsfc.nasa.gov



审图号:GS(2008)1402 号

图 1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch Map of Study Area

作。SRTM 数据需要利用 ArcGIS 进行裁剪、投影转换和重采样工作。TRMM 数据需要进行裁剪、重采样和波段运算。

2 研究方法

2.1 植被指数

为精确反映植被信息,建立植被指数与温度之间的关系,本文选取归一化植被指数 *NDVI* 和增强型植被指数 *EVI* 用来表示植被生长状况信息。*NDVI*,即归一化植被指数,用以表现植物生长状态、植被空间分布密度及植被冠层的背景影响等,在利用遥感图像进行植被研究中得到广泛应用。*EVI*,增强型植被指数,增加了冠层背景调整因子,使得 *EVI* 对大多数冠层背景不敏感,提高植被信息的反映精度。具体公式如下:

$$NDVI = (\rho 2 - \rho 1)/(\rho 2 + \rho 1) \quad (2)$$

$$EVI = G[(\rho 2 - \rho 1)/(\rho 2 + C1 \times \rho 1 - C2 \times \rho 3) + L] \quad (3)$$

式中:$\rho 1$,$\rho 2$,$\rho 3$ 分别对应 MODIS 的第 1 波段(620 ~ 670 nm),第 2 波段(841 ~ 876 nm)和第 3 波段(459 ~ 479 nm)反射率。系数 L 为冠层背景调整参数,$C1$,$C2$ 为气溶胶电阻项系数,G 为增益因子[24]。

2.2 *TVDI* 原理

土壤水分的多寡影响着地表温度的高低。当土壤水分充足,植被的蒸散作用增强,使得地表温度下降。相反,土壤水分较少时,植被蒸散作用降低,地表温度升高。土壤湿度状况与地表温度之间存在明显的负相关性。PRICE 等[25]发现遥感影像所表现出的温度—植被指数特征空间的散点图为三角形。SANDBOIT 等[11]对简化的 $T_S/NDVI$ 三角形空间进行了研究,提出表示土壤湿度的温度植被干旱指数 *TVDI* 的概念,定义为:

$$TVDI = \frac{T_S - T_S(VI)_{\min}}{T_S(VI) - T_S(VI)_{\min}} \quad (4)$$

$$T_S(VI)_{\max} = a_{\max} + b_{\max} \times VI \quad (5)$$

$$T_S(VI)_{\min} = a_{\min} + b_{\min} \times VI \quad (6)$$

式中:T_S 代表任意一点像元的地表温度值,$T_S(VI)_{\max}$ 为干边拟合方程,$T_S(VI)_{\min}$ 为湿边拟合方程,$a_{\max}$ 和 $b_{\max}$ 为干边线性拟合参数,$a_{\min}$ 和 $b_{\min}$ 为湿边线性拟合参数。*VI* 在本文中表示 *NDVI* 和 *EVI*。

2.3 改进型 *TVDI* 的构建

2.3.1 *mTVDI* 模型构建过程 *TVDI* 作为一种水分胁迫指标,通过 *LST* 和 *VI* 之间建立 T_S/VI 特征空间来提取干湿边方程,进而评估研究区的旱情状况。对 *TVDI* 模型进行改进需要考虑数据本身以及研究区特有的地理环境。就数据源本身而言,遥感数据源会受到云的影响使得模型精度大大降低,因此需要去除云的干扰;其次新疆干旱区面积广大,地势起伏较大,地表温度数据与实际地表温度之间易产生偏差,也会降低模型精度。因此本文对 *TVDI* 模型的改进主要有两个方面:(1)对遥感影像进行去云处理。(2)对地表温度数据进行地形校正。改进后的 *TVDI* 模型即为 *mTVDI*。具体工作包括:(1)利用 MOD13A2 数据提取不同时相 *NDVI* 和 *EVI*,将相同时相的 *LST* 数据和 *NDVI*,*EVI* 数据按照时序一一对应。(2)对遥感影像进行去云处理。(3)对 *LST* 数据进行地形校正。(4)计算 T_S 及校正后 T_S 与 *VI* 的特征空间并提取干湿边方程。(5)利用不同干湿边方程分别计算 $TVDI_N$,$TVDI_E$,$mTVDI_N$,$mTVDI_E$。具体构建流程如图 2。

2.3.2 去云处理 由于气候、天气的原因,大部分影像在获取时或多或少都会受到云的影响,尤其是大范围、长时序光谱数据。云的存在使得遥感影像在某些区域存在数据缺失,大气背景条件存在明显差异,同时,也会影响到地表温度的反演精度。为了保证 *TVDI* 模型反演精度,需要对影像进行去云处理。现有的处理方式有两种:一种是将受云覆盖的

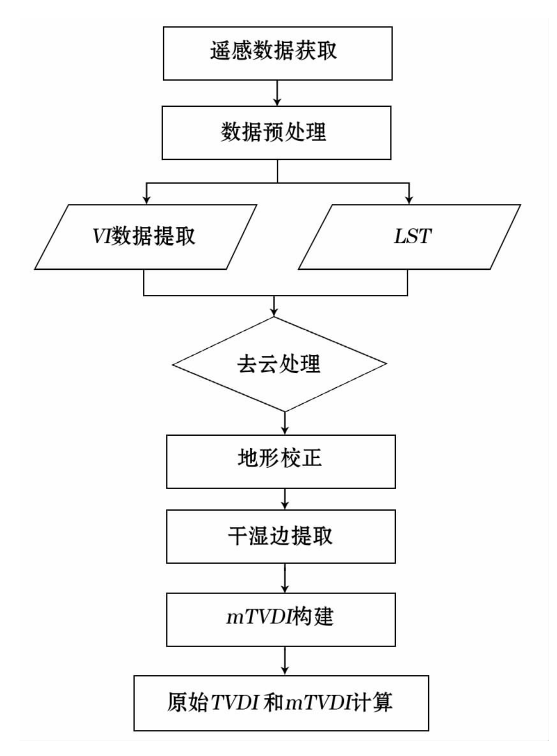


图 2 *mTVDI* 模型构建

Fig. 2 *mTVDI* model construction

区域进行数据恢复,消除云的影响;另一种是检测云的存在,利用掩膜进行去除,不参与模型计算。为了保证反演精度,本文将有云的区域进行掩膜计算,去除云对 *TVDI* 模型精度的影响。

2.3.3 地形校正 利用 *TVDI* 模型进行旱情监测,除了受到地表温度、植被覆盖度的影响外,还受到地表起伏状况、土壤质地及其所造成的大气辐射不均衡等多方面的影响。因此本文利用数字高程数据对地表温度进行校正,以消除地形对大区域太阳辐射差异的影响。公式如下:

$$T_2 = T_1 + m \times H \tag{7}$$

式中:T_2代表校正后的地表温度,T_1 代表原始地表温度,H 为高程值,m 为高程修正系数。

2.3.4 干湿边提取 干湿边的提取是模型构建的重要内容。干湿边提取即利用植被指数数据与最大最小地表温度数据进行线性拟合,获取干湿边方程。本文提取干湿边的方法:*VI* 值范围:0~1,以 0.01 + 0.02n(n = 1,2,…,99)为中心,将相同 *VI* 与所对应的改进后的 T_S 的最大值和最小值对应,最后采用最小二乘法拟合干边和湿边。利用 R 语言编程,自动提取干湿边。植被生长季(第 97~305 d)干湿边方程的结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出,改进 T_S/VI 干湿边方程拟合效果总体优于原始 T_S/VI 干湿边方程拟合效果。T_S/EVI 和改进 T_S/EVI 拟合效果优于 $T_S/NDVI$ 和改进 $T_S/NDVI$ 拟合效果。改进 T_S/EVI 干边拟合方程 R^2 在 0.8 以上,湿边拟合方程 R^2 在 0.5 以上,拟合效果最好,表现出了一定的优势。

3 结果与分析

3.1 模型计算与分析

3.1.1 *TVDI* 计算结果对比分析 *TVDI* 的取值范围为 0~1,当 *TVDI* 趋于 1 时颜色越深,表示旱情愈加严重,当 *TVDI* 趋于 0 时颜色越浅,表示该地较为湿润。图 3 利用 $TVDI_N$,$TVDI_E$,$mTVDI_N$,$mTVDI_E$ 四种模型计算出的 2015 年第 177 d 研究区旱情空间分布情况。据图可以看出,研究区 *TVDI* 值较大区域主要集中在盆地地区,盆地地形使得大气不易散热、蒸发旺盛、且植被丰富,水分需求量巨大,因此干旱程度较为严重。*TVDI* 值较小的区域主要分布在阿尔泰山脉、天山山脉和昆仑山脉及其周围。这是由于这些区域在这个时期冰雪融水补给较为充足,所以表现出湿润的状态。四种模型均表现出了一致的旱情分布特征。

3.1.2 *TVDI* 与土壤湿度相关性比较 利用 $TVDI_N$,$TVDI_E$,$mTVDI_N$,$mTVDI_E$ 模型计算结果与 6 月份土壤实测数据进行相关性分析。由图 4 可以看出,$mTVDI_E$ 与实测数据相关性最高,R^2 = 0.74。相比其它模型表现出了一定的优越性。因此本文选取 $mTVDI_E$ 作为研究区旱情监测模型,对 2015 年干旱区植被生长季旱情进行监测。

3.2 $mTVDI_E$ 时空分布

图 5 为 2015 年新疆植被生长季 $mTVDI_E$ 旱情监测结果。从空间上看:(1)旱情最严重的地方主要分布在吐鲁番盆地及哈密盆地西部。在整个生长季当中,吐鲁番盆地及哈密盆地西部都处于极度干旱状态。主要原因是该地区海拔较低,盆地地形使得热气流无法向外扩散,蒸发强烈,旱情最为严重。(2)旱情较为严重的地区分布在塔里木盆地,该地区沙漠广布,地表蒸发旺盛,且四周有山脉阻挡,水汽难以到达形成降水,致使该地旱情较为严重。(3)旱情较为严重的另一地区为准噶尔盆地,但其旱情状况波动较大。在第 129 d,161 d 和 177 d 旱情较为严重,而其他时间旱情有所缓解甚至表现出

正常的状态。这是由于该地区为新疆重要的农业种植区,人为灌溉活动较为频繁,使得该区域旱情状况不稳定。(4)旱情不明显的区域即正常状态下的区域主要分布在天山山脉、阿尔泰山山脉和昆仑山脉附近,这些地方在植被生长季时期既有雨水补给又有高山冰雪融水补给,因此并不会出现明显的干旱状况。(5)旱情不明显的区域还有塔里木河周围,在植被生长季时期,河流对周围农田和树林等绿洲区起到了补给灌溉的作用。(6)较为湿润的区域分布在天山山脉、阿尔泰山山脉和昆仑山脉。由于植被生长季阶段温度较高,冰雪融水丰富,因此表现出较为湿润的状态。

从时间分布上看:(1)第161,177,193,209,225,241天旱情较为严重,这是由于2015年伊朗副高正在新疆上空稳定停留且不断增强所致。(2)其他时间段新疆整体相对湿润。由于处于换季时期,研究区整体降水增多,$mTVDI_E$ 值较小,全疆旱情有所减缓。

3.3 TRMM降水数据与 $mTVDI_E$ 相关性分析

图6利用每月平均每小时降水数据乘以24解算得到平均每月每天降水量数据。根据各月平均每天降水分布来看:6,7,8月降水分布区域较小,9,10月份降水量分布区域较大。与 $mTVDI_E$ 时空分布图相比较可以看出:(1)6,7,8月份全疆降水偏少,对应的 $mTVDI_E$ 值也偏高,全疆呈现出严重干旱态势。(2)9,10月份全疆降水偏多,对应的 $mTVDI_E$ 值偏低,全疆旱情有所缓解。

为进一步探究新疆旱情与降水的关系,本文对4~10月 $mTVDI_E$ 结果与降水数据进行相关性分析。结果如图7:4月 $R^2=0.449\,4$,5月 $R^2=0.415\,9$,6月 $R^2=0.409\,6$,7月 $R^2=0.431\,4$,8月 $R^2=0.43$,9月 $R^2=0.444\,2$,10月 $R^2=0.461\,3$。由此可以看出,生长季各月 $TVDI$ 与降水之间存在负相关关系,其结果均通过了 $P<0.01$ 显著性检验。综上,新疆旱情与降水表现出一定的相关性,降水的多少影响着新疆植被生长季旱情的广度及严重程度。

4 结论

为了提高 $TVDI$ 模型对植被生长季旱情监测的敏感性,提高 $TVDI$ 模型旱情监测精度,本文利用植被指数与改进后的地表温度数据构建了改进型的旱情监测模型 $mTVDI$,对比分析 $TVDI_N$,$TVDI_E$,$mTVDI_N$,$mTVDI_E$ 四个模型指示旱情的优劣,选取最佳模型对2015年新疆干旱区植被生长季旱情进行时空分析并利用TRMM降水数据对其进行验证。得到

表2 干湿边方程拟合方程

Tab.2 Dry and wet edge fitting equation

原始 $T_S/NDVI$	干边方程	R^2	湿边方程	R^2
第97天	$y=-102.389x+322.43$	0.813 7	$y=54.989x+223.620\,5$	0.463 8
第116天	$y=-72.316x+332.909$	0.894 7	$y=70.537\,2x+225.267\,3$	0.633 9
第129天	$y=-64.800\,1x+337.700\,2$	0.923 8	$y=68.915\,2x+225.878\,4$	0.813 4
第145天	$y=-62.147\,8x+338.749\,4$	0.907 8	$y=62.822\,1x+220.172\,2$	0.863 6
第161天	$y=-61.905x+344.246\,3$	0.854 2	$y=51.684\,6x+225.582\,4$	0.808 5
第177天	$y=-49.183x+339.811$	0.863 1	$y=51.178\,6x+229.148\,4$	0.868 7
第193天	$y=-51.961\,7x+342.553\,4$	0.846 3	$y=40.735\,7x+240.95$	0.675 3
第209天	$y=-49.987\,9x+345.148\,3$	0.960 6	$y=59.178\,6x+234.631\,1$	0.855
第225天	$y=-40.713\,8x+336.680\,8$	0.961 5	$y=73.300\,5x+230.373$	0.849 3
第241天	$y=-38.135\,5x+330.078\,9$	0.931 1	$y=85.971x+227.824\,8$	0.776
第257天	$y=-51.897\,2x+328.308\,3$	0.758 5	$y=75.330\,9x+230.586$	0.554 8
第273天	$y=-52.392\,6x+320.093\,6$	0.801 8	$y=72.284\,9x+233.311\,1$	0.883 6
第289天	$y=-55.619\,6x+311.206\,2$	0.761 9	$y=29.586\,4x+241.466$	0.470 9
第305天	$y=-90.498\,6x+308.063\,7$	0.857 9	$y=41.236\,4x+234.459\,2$	0.577 2
第97天	$y=-67.532\,7x+322.143\,6$	0.845 4	$y=31.684x+230.736\,4$	0.501 9
第116天	$y=-51.926\,1x+332.059\,9$	0.902 1	$y=51.342x+231.032\,9$	0.749 5

(续表)

原始 T_S/EVI	干边方程	R^2	湿边方程	R^2
第 129 天	$y=-49.9454x+337.8417$	0.8987	$y=43.921x+233.2306$	0.7371
第 145 天	$y=-48.998x+338.8217$	0.889	$y=51.904x+226.4302$	0.895
第 161 天	$y=-48.6214x+343.6848$	0.8359	$y=44.334x+229.1158$	0.8182
第 177 天	$y=-44.2897x+341.0727$	0.8771	$y=42.4773x+230.9544$	0.8423
第 193 天	$y=-49.1764x+344.8575$	0.8072	$y=31.5382x+240.2222$	0.5334
第 209 天	$y=-46.4525x+347.5285$	0.9092	$y=45.192x+234.9188$	0.7954
第 225 天	$y=-43.0858x+340.6919$	0.8236	$y=46.0811x+234.4848$	0.8988
第 241 天	$y=-42.1441x+334.2512$	0.7958	$y=43.7954x+234.1344$	0.7341
第 257 天	$y=-48.6544+331.1991$	0.8026	$y=39.7123x+235.5019$	0.7439
第 273 天	$y=-40.8613x+320.9811$	0.869	$y=32.7712x+236.9183$	0.7142
第 289 天	$y=-45.0071x+315.9368$	0.862	$y=25.6997x+237.21$	0.5822
第 305 天	$y=-40.1909x+303.949$	0.864	$y=23.8662x+235.0357$	0.5416
改进 $T_S/NDVI$	干边方程	R^2	湿边方程	R^2
第 97 天	$y=-68.3952x+318.9615$	0.8374	$y=27.023x+259.4055$	0.5434
第 116 天	$y=-63.3263x+331.2671$	0.8804	$y=21.7238x+264.7953$	0.4049
第 129 天	$y=-48.7321x+333.657$	0.9545	$y=36.7843x+262.1616$	0.8558
第 145 天	$y=-51.0312x+336.224$	0.9512	$y=30.0268x+260.6747$	0.8317
第 161 天	$y=-47.4298x+340.3615$	0.8917	$y=25.7808x+264.1009$	0.7793
第 177 天	$y=-39.5782x+337.4621$	0.9271	$y=28.5481x+265.7217$	0.8837
第 193 天	$y=-42.3922x+339.938$	0.932	$y=20.1841x+275.5498$	0.6094
第 209 天	$y=-45.3556x+344.3545$	0.9464	$y=30.7566x+270.7659$	0.7896
第 225 天	$y=-35.8816x+335.8604$	0.9519	$y=41.0712x+267.5265$	0.8636
第 241 天	$y=-32.2718x+329.0471$	0.9288	$y=42.6728x+267.6737$	0.7331
第 257 天	$y=-38.2484x+325.3218$	0.851	$y=37.5855x+267.5614$	0.5315
第 273 天	$y=-47.0038x+319.31$	0.9031	$y=38.444x+260.6429$	0.8655
第 289 天	$y=-37.1509x+310.5137$	0.8519	$y=12.3601x+271.8396$	0.4341
第 305 天	$y=-52.5147x+306.6943$	0.89	$y=33.4521x+259.4716$	0.7991
改进 T_S/EVI	干边方程	R^2	湿边方程	R^2
第 97 天	$y=-45.0286x+318.4631$	0.8629	$y=16.7614x+261.889$	0.6764
第 116 天	$y=-42.9155x+329.7231$	0.9409	$y=16.8431x+265.3643$	0.5863
第 129 天	$y=-42.3043x+335.525$	0.8854	$y=14.5378x+267.8955$	0.6585
第 145 天	$y=-42.7988x+337.2321$	0.9081	$y=22.2449x+263.8866$	0.8535
第 161 天	$y=-40.7368x+341.42$	0.8526	$y=21.567x+265.9404$	0.8526
第 177 天	$y=-38.3072x+339.6182$	0.9067	$y=21.667x+267.1228$	0.8602
第 193 天	$y=-41.6919x+342.4951$	0.8782	$y=15.127x+275.2718$	0.5784
第 209 天	$y=-42.3353x+346.5118$	0.8957	$y=26.1099x+269.7477$	0.8336
第 225 天	$y=-37.1066x+338.991$	0.862	$y=25.3664x+269.6553$	0.8809
第 241 天	$y=-36.1488x+332.7885$	0.8369	$y=19.8203x+271.4113$	0.7094
第 257 天	$y=-37.8594x+328.1755$	0.9015	$y=17.9601x+270.7752$	0.6438
第 273 天	$y=-34.4999x+319.4241$	0.9309	$y=22.4186x+260.9816$	0.8579
第 289 天	$y=-33.4049x+314.2149$	0.966	$y=12.5241x+269.1296$	0.6424
第 305 天	$y=-28.7884x+304.9766$	0.9409	$y=18.4677x+259.854$	0.8774

图 3　第 177 天研究区 *TVDI* 模型计算结果

Fig. 3　Results of *TVDI* calculations in the study area on the 177th day

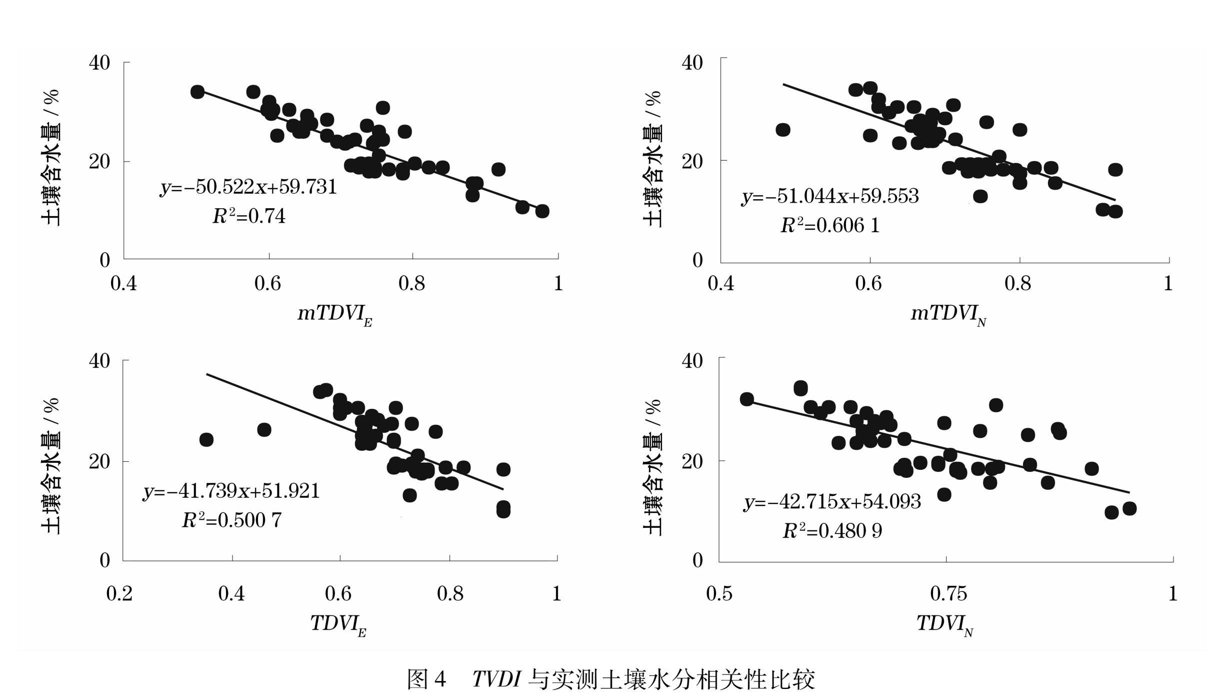


图 4　*TVDI* 与实测土壤水分相关性比较

Fig. 4　Correlation between the *TVDI* and measured soil moisture

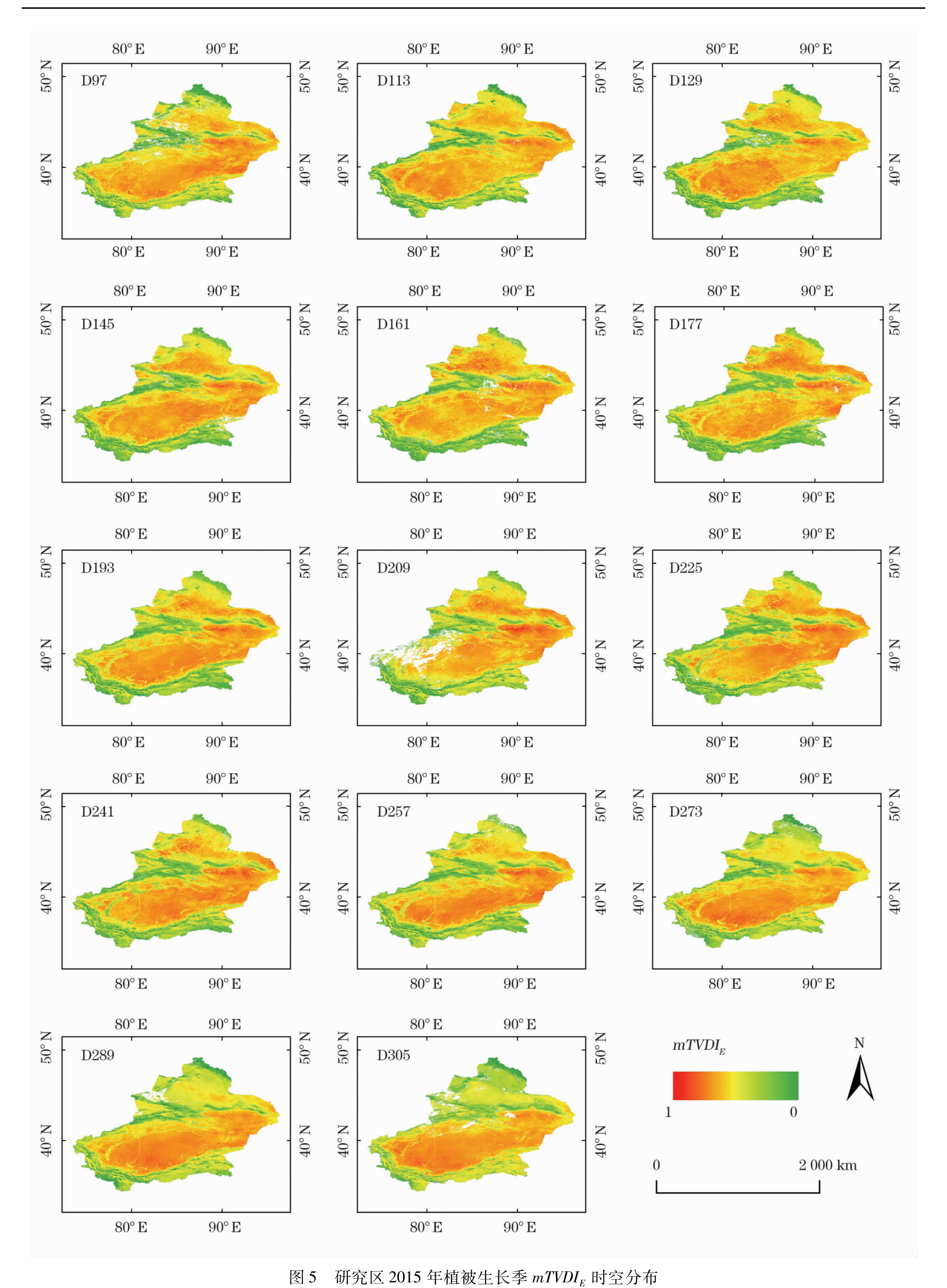


图 5　研究区 2015 年植被生长季 $mTVDI_E$ 时空分布

Fig. 5　Temporal and spatial distribution of $mTVDI_E$ in the growing season of 2015 in the study area

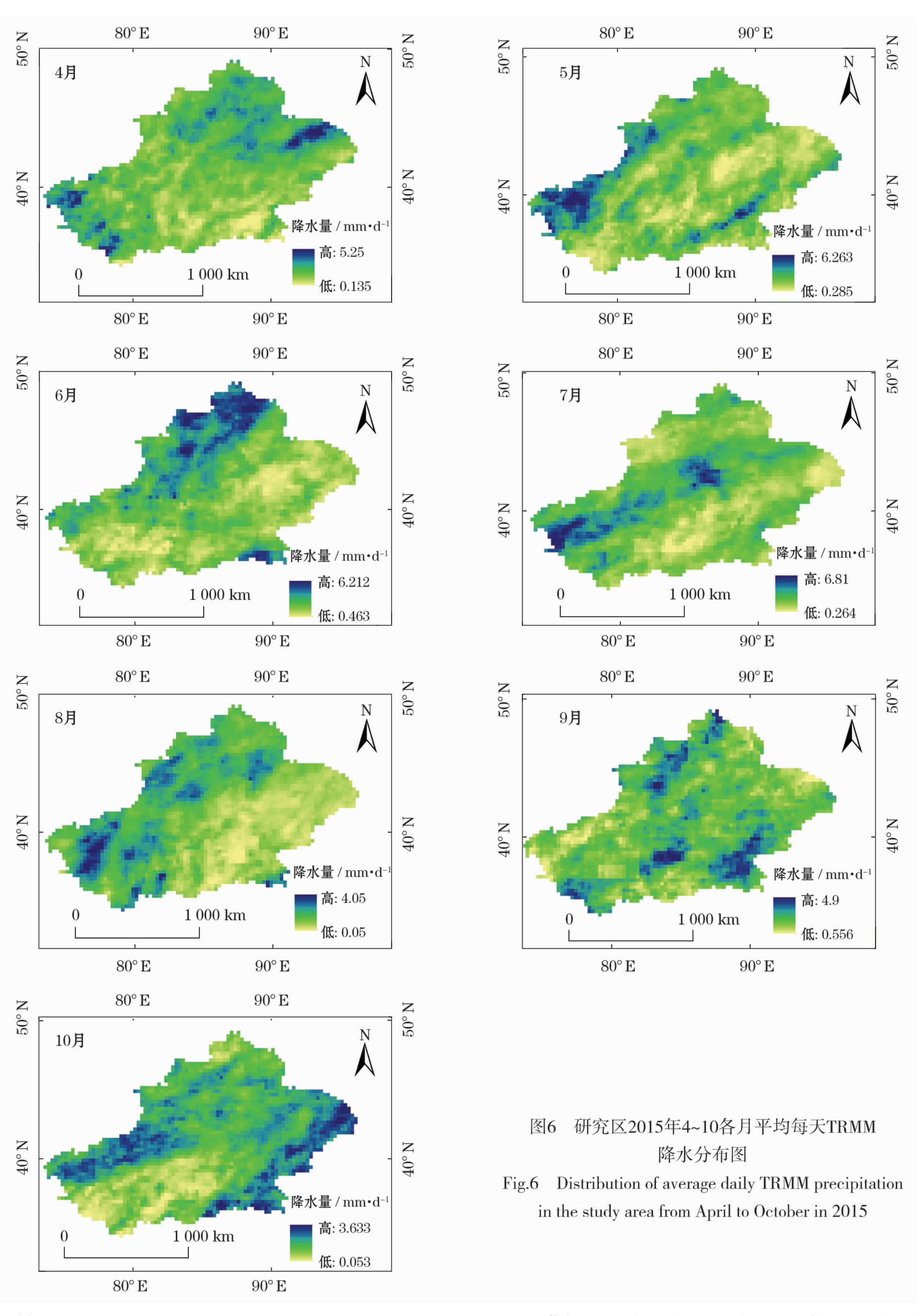


图6　研究区2015年4~10各月平均每天TRMM降水分布图

Fig.6　Distribution of average daily TRMM precipitation in the study area from April to October in 2015

以下结论:(1) 经过地形校正后的 $mTVDI_E$ 对干旱区旱情监测效果最好,与土壤实测数据相关性最高,$R^2=0.74$。(2) 新疆 2015 年旱情分布以塔里木盆地和准噶尔盆地为两个干旱中心,旱情状况由严重逐步向周围山区递减至湿润状态。(3) 从时间上看,6,7,8 月份全疆旱情较为严重,所受干旱影响面

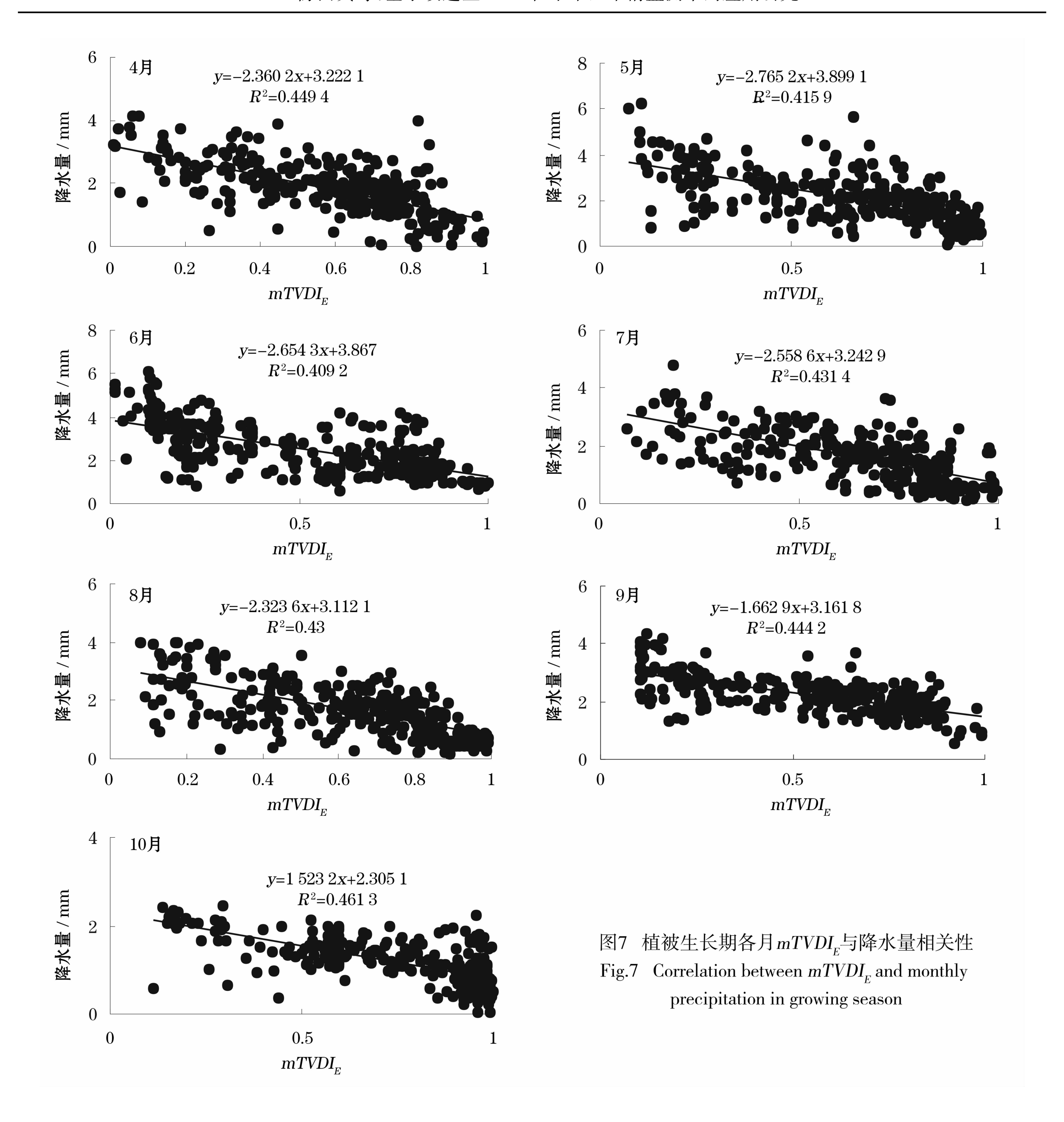


图7 植被生长期各月 $mTVDI_E$ 与降水量相关性

Fig.7 Correlation between $mTVDI_E$ and monthly precipitation in growing season

积较大。(4)降水与新疆旱情具有一定的相关性，6,7,8 月份全疆降水偏少,9,10 月份全疆降水偏多，与对应的 $mTVDI_E$ 结果表现出一致的变化特征，由此可见降水多寡影响着新疆干旱区旱情状况。(5) $mTVDI_E$ 与 TRMM 具有一定的相关性，$mTVDI_E$ 对研究区旱情状况具有一定的指示作用。

综上，基于增强型植被指数与经过地形校正后的地表温度数据所构建的 $mTVDI_E$ 模型能够满足干旱区植被生长季旱情监测的目的。$mTVDI_E$ 模型所表现出的旱情状况与土壤水分之间显示出较强的相关性，对全球干旱区旱情研究具有很强的参考意义。

5 讨 论

$mTVDI_E$ 模型能够方便高效的反映大区域旱情状况，但还存在以下不足之处，主要表现在：(1)遥感影像质量依然是影响 *TVDI* 模型精度的重要因素。(2)新疆地区面积广大，土壤质地、土地利用类型的不同所表现出的旱情状况也不尽相同。因此接下来的工作将从以上两个方面进行研究。

参考文献(References)

[1] ZORMAND S, JAFARI R, KOUPAEI S S. Assessment of PDI, MP-

DI and TVDI drought indices derived from MODIS Aqua/Terra Level 1B data in natural lands[J]. Natural Hazards, 2017, 86(2): 757 - 77

[2] XU Yaping, WANG Lei, ROSS KEMTON W, et al. Standardized soil moisture index for drought monitoring based on soil moisture active passive observations and 36 years of north american land data assimilation system data: A case study in the southeast United States[J]. Remote Sensing, 2018, 10(2): 301.

[3] 高涛涛,殷淑燕,王水霞. 基于 *SPEI* 指数的秦岭南北地区干旱时空变化特征[J]. 干旱区地理,2018,41(4):761 - 770. [GAO Taotao, YIN Shuyan, WANG Shuixia. Temporal and spatial variation characteristics of drought in North and South Qinling Mountains based on *SPEI* index[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(4): 761 - 770.]

[4] 薛海丽,张钦,唐海萍. 近 60 a 内蒙古不同草原类型区极端气候和干旱时间特征分析[J]. 干旱区地理,2018,41(4):701 - 711. [XUE Haili, ZHANG Qin, TANG Haiping. Extreme temperature and drought events in four different grassland areas of Inner Mongolia in recent 60 years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(4): 701 - 711]

[5] REZZA S, ISLAM N, RAHMAN M M. Meteorlogical drought monitoring using satellite imagery: A case study on Rajshahi, Naogaon and Jaipurhat of Bangladesh[C]. National Conference on Water Resources Engineering, 2018.

[6] 王俊霞,朱秀芳,刘宪锋,等. 基于多源数据的河南省农业干旱监测方法研究[J]. 国土资源遥感,2018,30(1):180 - 186. [WANG Junxia, ZHU Xiufang, LIU Xianfeng, et al. Research on agriculture drought monitoring method of Henan Province with multi-sources data[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2018, 30(1): 180 - 186.]

[7] 蒋慧敏,刘春云,贾健,等. 乌鲁木齐地区夏季气象干旱的变化特征及成因分析[J]. 干旱区地理,2018,41(4):693 - 700 [JIANG Huimin, LIU Chunyun, JIA Jian, et al. Characteristics and causes of meteorological drought in summer in Urumqi[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(4): 693 - 700]

[8] 谢培,顾艳玲,张玉虎,等. 1961—2015 年新疆降水及干旱特征分析[J]. 干旱区地理,2017,40(2):332 - 339 [XIE Pei, GU Yanling ZHANG Yuhu, et al. Characteristics of precipitation and drought in Xinjiang during the past 1961—2015 years[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 332 - 339]

[9] DU Lingtong, SONG Naiping, LIU Ke, et al. Comparison of two simulation methods of the temperature vegetation dryness Index (TVDI) for drought monitoring in semi-arid regions of China[J]. Remote Sensing, 2017, 9(2): 19.

[10] LIU Ying, YUE Hui. The temperature vegetation dryness index (TVDI) based on bi-parabolic NDVI-Ts space and gradient-based structural similarity (GSSIM) for long-term drought assessment across Shaanxi Province, China (2000—2016)[J]. Remote Sensing, 2018, 10(6): 959.

[11] SANDHOLT I, RASMUSSEN K, ANDERSEN J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2): 213 - 224.

[12] TAGESSON T, HORISON S, NIETO H, et al. Disaggregation of SMOS soil moisture over West Africa using the temperature and vegetation dryness index based on SEVIRI land surface parameters[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 206: 424 - 441.

[13] HE Dong, YI Guihua, ZHANG Tingbin, et al. Temporal and spatial characteristics of EVI and its response to climatic factors in recent 16 years based on grey relational analysis in inner mongolia autonomous region, China[J]. Remote Sensing, 2018, 10(6): 961.

[14] ZHAO Shuhe, CONG Dianmin, HE Kexun, et al. Spatial-temporal variation of drought in China from 1982 to 2010 based on a modified Temperature Vegetation Drought Index (mTVDI)[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 17473.

[15] SCHIRMBECK LW, FONTANA DC, SCHIMBECK J. Two approaches to calculate TVDI in humid subtropical climate of southern Brazil[J]. Scientia Agricola, 2018, 75(2): 111 - 120.

[16] ZHU Wenbin, JIA Shaofeng, LV Aifeng. A time domain solution of the Modified Temperature Vegetation Dryness Index (MTVDI) for continuous soil moisture monitoring[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 200: 1 - 17.

[17] YANG Ruowen, WANG Hai, HU Jinming, et al. An improved temperature vegetation dryness index (iTVDI) and its applicability to drought monitoring[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(11): 2284 - 2294.

[18] 刘艳伟,王淑莹,焦忠帅,等. 基于温度植被干旱指数法(TVDI)的朝阳县干旱监测[J]. 浙江农业学报,2018,30(1):129 - 136. [LIU Yanwei, WANG Shuying, JIAO Zhongshuai, et al. Monitoring drought in Chaoyang County of Liaoning Province using temperature vegetation drought index (TVDI)[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2018, 30(1): 129 - 136.]

[19] 葛少青,张剑,孙文,等. 三种干旱指数在干旱区沼泽湿地土壤水分遥感反演中的应用[J]. 生态学报,2018,38(7):2299 - 2307. [GE Shaoqing, ZHANG Jian, SUN Wen, et al. Application of three drought indexes in soil moisture inversion using remote sensing in marsh wetlands of arid area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(7): 2299 - 2307.]

[20] 何宝忠,丁建丽,李焕等. 新疆植被物候时空变化特征[J]. 生态学报,2018,38(6):2139 - 2155. [HE Baozhong, DING Jianli, LI Huan, et al. Spatiotemporal variation of vegetation phenology in Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 2139 - 2155.]

[21] TESTA S, SOUDANI K, BOSCHENI K, et al. MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2018, 64: 132 - 144.

[22] ZHAO Xiaoqian, SU Yanjun, HU Tianyu, et al. A global corrected SRTM DEM product for vegetated areas[J]. Remote Sensing Letters, 2018, 9(4): 393 - 402.

[23] CAO Yueqian, ZHANG Wu, WANG Wenjing. Evaluation of TRMM

3B43 data over the Yangtze River Delta of China[J]. Scientific Reports,2018,8(1):5290.

[24] HUETE A,DIDAN K,MIURA T,et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment,2002,83(1):195 - 213.

[25] PRICE J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing,1990,28(5):940 - 948.

Application of modified *TVDI* in drought monitoring in arid areas

CHEN Bing-yin[1,2], YANG Liao[1], CHEN Xi[1,3], WANG Wei-sheng[1]

(1 *Xinjiang Institute of Ecology and Geography*, *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology*, *Urumqi* 830011, *Xinjiang*, *China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*; 3 *Research Center for Ecology and Environment of Central Asia*, *Chinese Academy of Sciences*, *Urumqi* 830011, *Xinjiang*, *China*)

Abstract: The drought is one of the most influential natural disasters on a global scale. The soil desertification and salinization from drought can cause irreversible damage to the ecological environment. On basis of the preprocessing and cloud removal of MODIS data, this paper modifies the *TVDI* model through terrain correction and constructed an modified Temperature Vegetation Dryness Index (*mTVDI*) for drought monitoring in arid regions of Xinjiang, China, and compared it with the traditional *TVDI* and verified it using soil measured data. The results showed as follows: (1) $mTVDI_E$ constructed by *EVI* (Enhanced Vegetation Index) and corrected *LST* (Land Surface Temperature) has the highest sensitivity to drought monitoring in arid area, and the correlation with measured soil moisture data is R^2:0.74; (2) In 2015, the drought in Xinjiang was centered in the Tarim Basin and the Junggar Basin, and the situation was gradually decreased from the serious drought in the centers to a humid state in the mountainous areas. From the time point of view, the drought in Xinjiang was the most serious in June, July and August; (3) The spatial and temporal distribution characteristics of drought in Xinjiang based on $mTVDI_E$ were compared and analyzed with TRMM precipitation data. The result shows that the spatial and temporal distribution of drought was consistent between the two methods. The correlation between precipitation and $mTVDI_E$ in different time periods was high, and passed the $P < 0.01$ significance test. Above all, $mTVDI_E$ based on *TVDI* can effectively carry out drought monitoring in arid regions of Xinjiang with high precision. Therefore, this will provide reference for the quantitative research on drought monitoring at large regional scale in the future.

Key words: arid area; drought monitoring; *TVDI*; TRMM